

Maciej Auguściuk, Ewa Dziedzic, Marek Kaniewski, Artur Kawecki, Paweł Kiesiewicz, Tadeusz Knych, Mirosław Kuca, Paweł Kwaśniewski, Tadeusz Maciołek, Wiesław Majewski, Andrzej Mamala, Leszek Mierzejewski, Artur Rojek, Kazimierz Woźniak, Kazimierz Zasadziński

# Nowa generacja wysokoobciążalnych sieci trakcyjnych – YC120-2CS150 i YC150-2CS150 (2)

## Właściwości mechaniczne przewodów jezdnych z miedzi srebrowej

**Nowoczesny system sieci trakcyjnych dużej prędkości jazdy oraz zwiększonych mas pociągów wymaga zastosowania materiałów na przewody jezdne o zwiększonych parametrach wytrzymałościowych, przy jednoczesnym zapewnieniu możliwie najwyższej przewodności elektrycznej, co wynika z konieczności zapewnienia bezzakłócenowego odbioru prądu przez odbierak prądu z sieci w warunkach dużej prędkości jazdy pojazdów szynowych. Jednym z materiałów zapewniających korzystną relację całego zespołu właściwości – mechanicznych, elektrycznych, reologicznych i tribologicznych – przewodu jezdnego w realiach polskiego systemu zasilania kolei średnim napięciem 3 kV DC jest miedź srebrowa w gatunku Cu-Ag0,10.**

Prowadzone na Akademii Górniczo-Hutniczej od kilku lat intensywne badania dotyczące przewodów jezdnych z miedzi z dodatkiem srebra zaowocowały opracowaniem technologii wytwarzania i wdrożeniem do produkcji przewodów jezdnych typu DjpS100 (AC-100) w gatunku CuAg0,10 [1].

Przewody te mają konkurencyjne właściwości użytkowe w porównaniu z przewodami tradycyjnymi wykonanymi z miedzi elektrolitycznej o tym samym przekroju. Przewody jezdne typu AC-100 w gat. CuAg0,10 charakteryzują się ok. 8% wyższymi właściwościami mechanicznymi, ok. 20% wyższymi właściwościami reologicznymi, wyższą o ok. 150°C temperaturą rekrytalizacji, 25% niższym współczynnikiem tarcia, 45% niższym zużyciem, przy jednocześnie zachowanej wysokiej przewodności elektrycznej, bliskiej przewodności przewodów jezdnych typu AC-100 z miedzi w gat. ETP (różnica wynosi zaledwie 1,4%). Własności te czynią z przewodów DjpS100 doskonały zamiennik dotychczas stosowanych w polskich sieciach trakcyjnych przewodów Djp100. Przewody DjpS100 przeznaczone są dla linii kolejowych dużej prędkości jazdy, zwiększonych mas przewożonych towarów oraz ciężkich pojazdów, a także miejskich linii tramwajowych, gdzie występuje duża intensywność przejazdów [1, 2–4].

Jednakże wielkość przekroju przewodu jezdnego z miedzi srebrowej, wynoszącego 100 mm<sup>2</sup>, okazuje się niewystarczająca dla sieci trakcyjnych o bardzo dużej obciążalności prądowej, po-

wyżej 2,5 kA. Aby pobór prądu o tak dużym natężeniu nie powodował negatywnych skutków, jeśli chodzi o zmiany właściwości mechanicznych elementów nośno-przewodzących górnej sieci trakcyjnej – musiałaby ona składać się z większej liczby elementów celem zwiększenia przekroju elektrycznego, co komplikowałoby konstrukcję sieci i utrudniało uzyskanie wysokich parametrów jezdnych trakcji.

Dlatego, na bazie doświadczeń oraz z uwagi na bardzo korzystne cechy materiałowe, podjęto prace nad technologią produkcji przewodów jezdnych z miedzi srebrowej o zwiększonym przekroju, tj. 150 mm<sup>2</sup>. Przewody z miedzi z dodatkiem srebra o przekroju poprzecznym 150 mm<sup>2</sup> znajdują już obecnie zastosowanie przy budowie testowych odcinków nowego typu sieci trakcyjnych w Polsce, o podwyższonych parametrach mechanicznych i zwiększonej obciążalności prądowej (powyżej 2,5 kA). Sieci te, zasilane napięciem 3 kV DC, mają uproszczoną budowę, są trójprzewodowe i mają dwa przewody jezdne AC-150 o przekroju 150 mm<sup>2</sup> każdy, wykonane z miedzi w gat. CuAg0,10 oraz linę nośną o przekroju 120 mm<sup>2</sup> (sieć YC120-2CS150, przekrój całkowity 420 mm<sup>2</sup>) lub linę nośną o przekroju 150 mm<sup>2</sup> (sieć YC150-2CS150, przekrój całkowity 450 mm<sup>2</sup>) wykonaną z miedzi w gat. ETP. W nowym typie sieci zastosowano również nowe elementy osprzętu sieciowego wykonanego z brązu Cu-Ni-Si (w miejsce dotychczas stosowanego z brązu BA1032). Modernizacja osprzętu, polegająca na opracowaniu składu chemicznego nowego materiału, technologii wytwarzania elementów wraz z ich konstrukcją i optymalizacją kształtu została wykonana przez zespół naukowców Wydziału Metali Nieżelaznych AGH, przy współpracy z CNTK oraz konsultacji z użytkownikami sieci. Jak wykazują badania, elementy osprzętu nowego typu wykonanego ze stopu Cu-Ni-Si charakteryzują się znacznie lepszym zespołem właściwości mechaniczno-reologiczno-elektrycznych od dotychczas stosowanych rozwiązań opartych na stopie BA1032 i są przystosowane do montażu do sieci o większym przekroju, o większej obciążalności prądowej.

### Materiał do badań

Przedmiotem badań były przewody jezdne typu AC-150 z miedzi srebrowej w gat. CuAg0,10 o zespole właściwości mechaniczno-elektrycznych podanych w tabeli 1. W celach porównawczych

w artykule odniesiono się również do właściwości przewodów jezdnych typu AC-100 z miedzi w gat. CuAg0,10 oraz przewodów jezdnych typu AC-100 z miedzi w gat. ETP (tab. 5) [1, 2–3, 5].

Do badań ewolucji właściwości mechanicznych przewodów jezdnych wykorzystano również elementy osprzętu sieciowego w postaci uchwytów równoległych L150-Djps150 (do łączenia przewodu jezdnych i liny o przekroju 150 mm<sup>2</sup>) wykonanych z brązu Cu-Ni-Si (tab. 2), a także w celu zapewnienia miejscowego nagrzewania przewodu, nakładkę z węgla metalizowanego (zawartość miedzi ok. 25% wag., reszta grafit,  $\rho = 6 \mu\Omega\text{m}$ ). Rodzaj nakładki stykowej wykorzystanej do badań stosowany jest w eksploatacji w europejskich liniach kolejowych.

Tabela 1

**Zestawienie właściwości mechanicznych i elektrycznych badanych materiałów**

| Materiał<br>(przewód jezdny) | Właściwości mechaniczno-elektryczne |                    |                  |     |     |                          |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------------|------------------|-----|-----|--------------------------|
|                              | $R_m$<br>[MPa]                      | $R_{0,2}$<br>[MPa] | $A_{100}$<br>[%] | HB  |     | $\rho$<br>[n $\Omega$ m] |
|                              |                                     |                    |                  | PW  | PP  |                          |
| AC-100 (CuETP)               | 365                                 | 350                | 5,8              | 106 | 110 | 17,388                   |
| AC-100 (CuAg0,10)            | 384                                 | 359                | 5,2              | 113 | 116 | 17,656                   |
| AC-150 (CuAg0,10)            | 375                                 | 355                | 6,5              | 109 | 112 | 17,364                   |

Tabela 2

**Zestawienie właściwości mechanicznych i elektrycznych wykorzystanego do badań odporności cieplnej przewodów jezdnych elementu osprzętu sieciowego**

| Materiał (uchwyt równoległy<br>L150-Djps150) | Właściwości mechaniczno-elektryczne |                 |           |       |                       |
|--|-------------------------------------|-----------------|-----------|-------|-----------------------|
|  | $R_m$ [MPa]                         | $R_{0,2}$ [MPa] | $A_5$ [%] | HRB   | $\rho$ [n $\Omega$ m] |
| Cu-Ni-Si                                     | 620                                 | 500             | 6         | 86-88 | 37,9                  |

**Zakres badań**

Zakres badań obejmował badania:

- rozkładu temperatury w przewodzie jezdnych oraz osprzęcie mocującym pod wpływem prądu elektrycznego o różnym natężeniu przekazywanego w różnym czasie do nakładki z kompozytu węglowo-metalicznego;
- zmian właściwości mechanicznych przewodów jezdnych AC-150 poddanych miejscowemu nagrzewaniu prądowemu, w szczególności wytrzymałości na rozciąganie, twardości na przekroju poprzecznym przewodu oraz jej procentowej zmiany w zależności od różnej odległości od źródła ciepła;
- porównawcze odporności cieplnej przewodów jezdnych typu AC-100 oraz AC-150 wykonanych z miedzi srebrowej w gat. CuAg0,10 dla zakresu temperatur 300–440°C w czasie 1 godz. w celu ujawnienia potencjalnych różnic w dynamice spadku właściwości mechanicznych podczas wyżarzania w piecu z atmosferą ochronną.

**Parametry badań**

Badania prowadzone były w Laboratorium Badania Elementów Sieci Trakcyjnej, znajdującego się w Katedrze Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych na Wydziale Metali Nieżelaznych AGH w Krakowie.

Aby odwzorować warunki eksploatacyjne panujące w sieciach trakcyjnych, zastosowano metodę badawczą symulującą rzeczywiste warunki współpracy przewodu jezdnych z nakładką stykową odbieraka prądu. Badania prowadzone były w klimatyzowanym pomieszczeniu w temperaturze 18°C i wilgotności powietrza 65%.

Do realizacji eksperymentu wykorzystano możliwości podzespołów urządzenia do badania ścieralności przewodów jezdnych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, mianowicie sterowanego pneumatycznie układu wywierającego siłę docisku nakładki do przewodu jezdnych oraz układ prądowódzcy niskiego napięcia, generujący przepływ prądu stałego o natężeniu do 1200 A.

Rozkład temperatury w przewodzie jezdnych AC-150 oraz osprzęcie mocującym (uchwyt równoległy liny nośnej 150 mm<sup>2</sup> i przewodu jezdnych o przekroju 150 mm<sup>2</sup> L150-Djps150) mierzono za pomocą zestawu termopar typu K (NiCr-NiAl) podłączonych do toru pomiarowego Spider. Końcówki termoelementów zostały umieszczone w nawierconych otworach rozmieszczonych w przewodzie i uchwycie w określonych miejscach od źródła ciepła, jakie stanowił kontakt nakładki stykowej z węgla metalizowanego z przewodem jezdnych. Próbkę przewodów jezdnych, każda o długości 50 cm, mocowane były w specjalnie zaprojektowanym module zapewniającym z jednej strony uzyskanie wymaganej wartości siły dociskającej nakładki do przewodu, z drugiej zaś pozwalającym na połączenie z układem prądowódzcy przy wykorzystaniu nowego typu osprzętu mocującego wykonanego ze stopu miedź-nikiel-krzem. Przewód jezdny, uchwyt równoległy oraz element mocujący konstrukcji wsporczej modułu pomiarowego łączone były ze sobą za pomocą śrub ze stali nierdzewnej M10, dokręcanych kluczem dynamometrycznym z momentem 50 Nm; nakładka stykowa dociskana była do przewodu jezdnych ze stałą siłą 100 N.

Nagrzewanie przewodu jezdnych w celu uzyskania krzywych zmian temperatury w funkcji odległości od źródła ciepła realizowane było przy przepływie przez zestyk: przewód-nakładka prądu o natężeniu od 100 do 1000 A w czasie od 10 do 180 s.

Do testów właściwości mechanicznych wykorzystano jedynie niektóre z podanych powyżej pary konfiguracji: natężenie prądu – czas przepływu, dobierane na drodze eksperymentalnej.

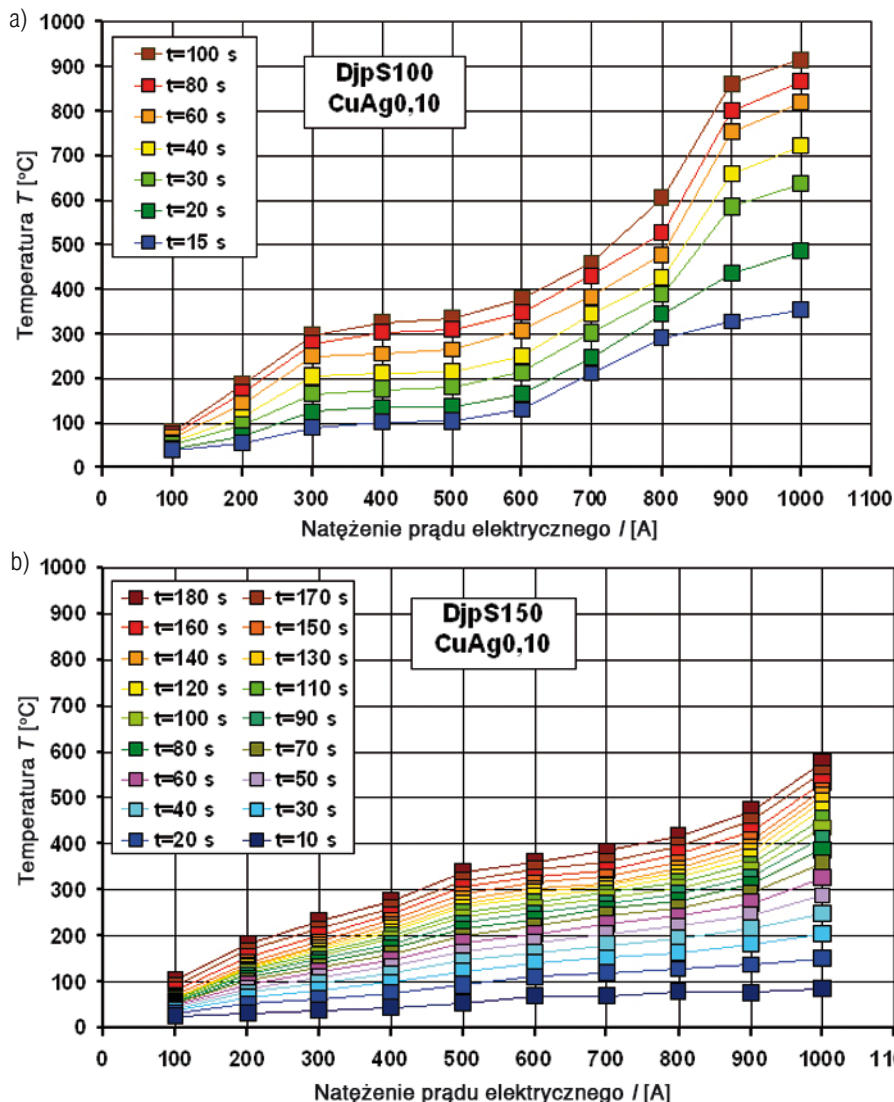
Zastosowanie nakładki stykowej z kompozytu węglowo-metalicznego umożliwiło, z uwagi na wysoką rezystancję materiału nakładki, osiągnięcie temperatur, przy których możliwe było porównanie odporności cieplnej badanych gatunków przewodów jezdnych.

Przyjęty w testach przedział wartości natężenia prądu (dla jednej nakładki oraz jednego przewodu) odbiega od warunków normalnego poboru prądu przez lokomotywę z górnej sieci trakcyjnej. Jednakże w celu pełnego opisu zmian właściwości mechanicznych przewodów jezdnych, niezbędne było zastosowanie ekstremalnych wartości natężenia prądu i czasu jego działania, umożliwiających zaobserwowanie ewolucji ich właściwości mechanicznych.

Próby wytrzymałościowe przeprowadzono na maszynie Zwick Z100, z prędkością ruchu trawersy 70 mm/min, natomiast badania zmian twardości przewodu na jego przekroju poprzecznym w zależności od odległości od źródła ciepła (co 1 cm) wykonano na twardościomierzu Brinella/Rockwella.

**Wyniki badań i ich analiza**

Badania przyrostu temperatury w przewodzie jezdnych na skutek płynącego prądu elektrycznego przez zestyk przewód-nakładka stykowa prowadzone dla AC-150 (CuAg0,10), których wyniki przedstawiono na rysunku 1b, zostały odniesione do rezultatów prowadzonych wcześniej badań z zastosowaniem przewodów typu AC-100 (CuAg0,10) [1, 2–4].



Rys. 1. Zbiórca wykres nagrzewania przewodów jezdnych pod wpływem prądu elektrycznego o różnym natężeniu przepływającym przez nakładkę stykową z węgla metalizowanego  
 a) przewód jezdny AC-100 w gat. CuAg0,10; b) przewód jezdny AC-150 w gat. CuAg0,10

Zaobserwowana różnica w osiąganych wartościach temperatury przewodów, zwłaszcza powyżej natężenia prądu wynoszącego 700 A, zwłaszcza dla wartości natężenia prądu 900–1000 A, jest naturalną konsekwencją zwiększonego przekroju elektrycznego AC-150, jego mniejszej rezystancji oraz większymi możliwościami odprowadzania ciepła do otoczenia. Biorąc pod uwagę tylko bilans cieplny dla obydwu gatunków przewodów jezdnych, wyznaczony z zależności (10), zauważyć można, że wyliczony teoretycznie przyrost temperatury dla przewodów AC-150 powinien być ok. 2,5 razy mniejszy niż dla przewodów AC-100, w takich samych warunkach prowadzonych testów – por. zależność (17).

$$I^2 \cdot R = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (10)$$

$$\frac{I^2 \cdot \rho_{el} \cdot l}{A} = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (11)$$

$$\frac{I^2 \cdot \rho_{el} \cdot l}{A} = \rho \cdot A \cdot l \cdot c \cdot \Delta T \quad (12)$$

$$\frac{I^2 \cdot \rho_{el}}{A^2} = \rho \cdot c \cdot \Delta T \quad (13)$$

$$A_{150} = 1,5A_{100} \quad (14)$$

$$\frac{I^2 \cdot \rho_{el}}{2,25 A_{100}^2} = \rho \cdot c \cdot \Delta T_{150} \quad (15)$$

$$\frac{I^2 \cdot \rho_{el}}{A_{150}^2} = \rho \cdot c \cdot \Delta T_{150} \quad (16)$$

$$\Delta T_{150} = \frac{\Delta T_{100}}{2,25} \quad (17)$$

Badania potwierdziły tę tendencję, szczególnie dla największych wartości natężenia prądu, gdzie rejestrowane wartości temperatur były dwukrotnie większe dla przewodów AC-100. Pewne odstępstwa od spodziewanej wartości teoretycznej mogły być wynikiem różnej intensywności odprowadzania ciepła oraz pewnej modyfikacji sposobu mocowania przewodów w przypadku AC-150.

Jak można zauważyć, w przypadku przewodów AC-150 możliwy jest przepływ przez nakładkę z węgla metalizowanego prądu o natężeniu 1000 A w czasie do 30 s, który nie powinien w miejscu zestyku podnieść temperatury powyżej 200°C. W analogicznym przypadku przewód AC-100 nagrzewał się do temperatury ponad 350°C. Jeszcze większe różnice w rejestrowanych temperaturach odnotowano wydłużając czas przepływu prądu, i tak np. po czasie 100 s prąd o natężeniu 1000 A nagrzał przewód AC-150 do temperatury ok. 450°C, natomiast przewód AC-100 do temperatury 900°C.

Obserwując dynamikę wzrostu temperatury przewodów dla niższych wartości natężenia prądu można stwierdzić mniejszą różnicę osiąganych wartości, jednakże pozostaje ona w dalszym ciągu znacząca. Jak wykazały pomiary, przepływający prąd elektryczny o natężeniu 700 A, po czasie 100 s nagrzewa przewód AC-150 do temperatury 300°C, natomiast przewód AC-100 do temperatury ok. 480°C.

Analizując krzywe nagrzewania pokazane na rysunku 1 b można zauważyć, że prąd o natężeniu 200 A, nawet po czasie 100 s nie spowodował przekroczenia temperatury 100°C w przewodzie jezdny AC-100. Te same parametry testu w przypadku przewodów AC-100 przyniosły wzrost temperatury do ok. 300°C. Pomiary temperatury uchwytu L150-Djp150 w obszarze bezpośredniego kontaktu z przewodem jezdny wykazały, że nawet dla prądu o natężeniu 1000 A i czasu jego przepływu 180 s wzrost temperatury w materiale nie przekroczył 50°C (w odległości 15 cm od miejsca kontaktu przewodu jezdny z nakładką stykową).

Obserwowane różnice w dynamice wzrostu i osiąganych wartościach temperatur między badanymi typami przewodów jezdnych skutkują odmiennymi charakterystykami zmian ich właściwości mechanicznych. Jak przedstawiono na rysunkach 2 i 3, dla

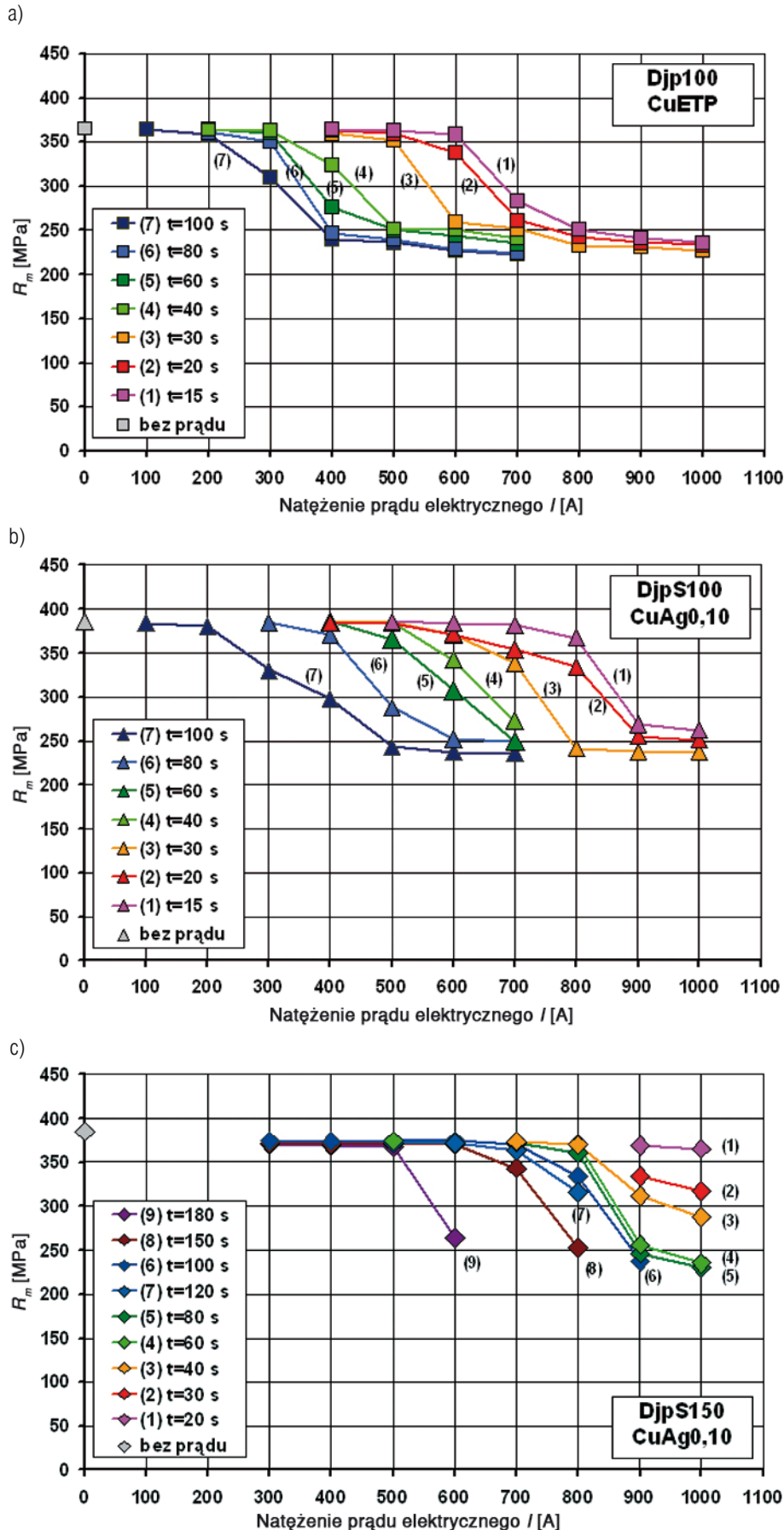
trzech rodzajów przewodów jezdnych zaobserwować można różne zakresy bezpiecznych, z punktu widzenia zachowania wysokich właściwości wytrzymałościowych, wartości natężenia prądu oraz czasu jego przepływu. Jeżeli dla celów porównawczych przyjmujemy założenie, że przepływający przez 40 s prąd nie powinien spowodować spadku wytrzymałości na rozciąganie, to okazuje się, że w przypadku przewodów AC-100 w gat. ETP maksymalnym natężeniem prądu jest 300 A, dla AC-100 w gat. CuAg0,10 jest 500 A, natomiast w przypadku AC-150 w gat. CuAg0,10 to 800 A.

Biorąc pod uwagę krótkie czasy przepływu prądu, np.  $t = 20$  s, to bez pogorszenia właściwości wytrzymałościowych przewody jezdne mogą odpowiednio przewodzić: AC-100 (ETP) – 500 A; AC-100 (CuAg0,10) – 600 A; AC-150 (CuAg0,10) – 1000 A.

Zdecydowane różnice w możliwościach odbioru przez nakładki węglowe prądu z przewodów jezdnych ujawniają się dla dłuższych czasów jego przepływu, np. dla  $t = 100$  s nie obserwuje się degradacji właściwości wytrzymałościowych dla: AC-100 (ETP) – 200 A; AC-100 (CuAg0,10) – 400 A; AC-150 (CuAg0,10) – 800 A.

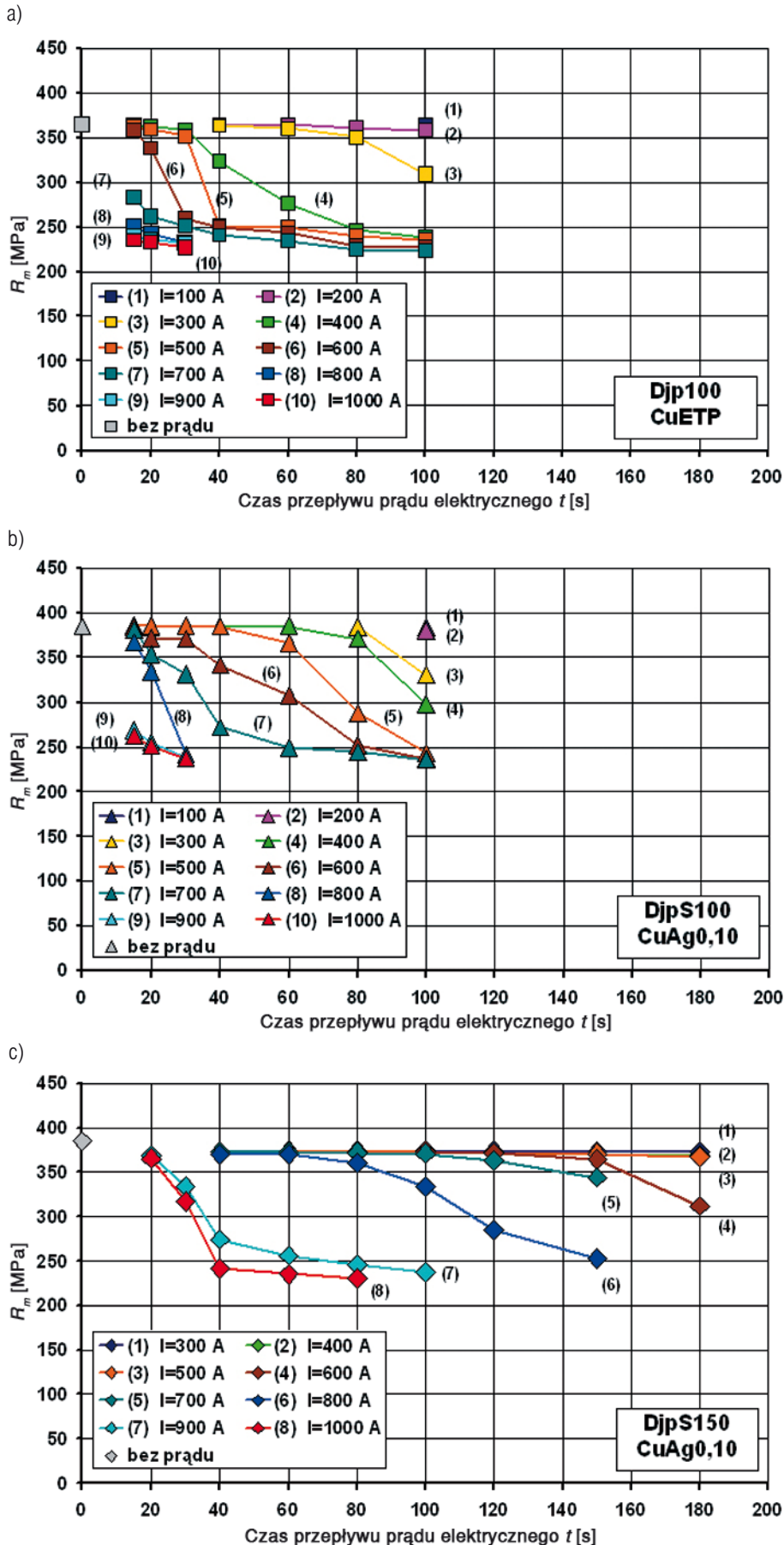
Co więcej, z przeprowadzonych badań wynika, że wydłużenie czasu przepływu prądu do 180 s w przypadku przewodów AC-150 (CuAg0,10) nie powoduje obniżenia ich wytrzymałości na rozciąganie dla wielkości natężenia prądu do 500 A. Skrócenie tego czasu do 150 s powiększa dopuszczalne natężenie prądu do 600 A. Wyniki te stanowią cenną informację dotyczącą możliwości zwiększenia wielkości natężenia prądu odbieranego z sieci przez lokomotywę w przypadku zastosowania przewodów jezdnych AC-150 (CuAg0,10) bez pogorszenia ich właściwości użytkowych w kontekście projektowania i budowy nowych typów sieci trakcyjnych.

Należy jednak mieć na uwadze, że przedstawione zależności dopuszczalnych wartości natężenia prądu i czasu ich przepływu na



Rys. 2. Zależności  $R_m = f(I, t)$  przewodów jezdnych po nagrzewaniu prądowym  
 a) AC-100 w gat. ETP; b) AC-100 w gat. CuAg0,10; c) AC-150 w gat. CuAg0,10





Rys. 3. Zależności  $R_m = f(I, t)$  przewodów jezdnych po nagrzaniu prądowym  
 a) AC-100 w gat. ETP; b) AC-100 w gat. CuAg0,10; c) AC-150 w gat. CuAg0,10

zmianę właściwości mechanicznych przewodów jezdnych zostały uzyskane dla konfiguracji zestyku: jeden przewód jezdny – pojedyncza nakładka stykowa z kompozytu węglowo-metalicznego w warunkach statycznych. Eksperyment miał na celu jedynie wykazanie różnic w odporności cieplnej badanych rodzajów przewodów jezdnych podczas nagrzewania prądowego. W warunkach rzeczywistych, odbiór prądu przez lokomotywę z sieci jezdnej, z zazwyczaj dwóch przewodów jezdnych, odbywa się za pomocą większej liczby miedzianych nakładek stykowych, tak więc obciążenie prądowe przypadające na pojedynczy zestyk jest znacznie mniejsze od występującego w eksperymencie laboratoryjnym.

Potwierdzeniem przedstawionych zależności zmian właściwości wytrzymałościowych są wyniki badań twardości przewodów jezdnych przeprowadzonych w różnej odległości od źródła ciepła, jaki stanowił zestyk: przewód–nakładka. Aby oszacować obszar objęty wpływem temperatury na zmianę twardości przewodów jezdnych na ich długości, sporządzono charakterystyki zmian twardości  $HB = f(l, t, I)$  na przekroju poprzecznym przewodów.

Analizując uzyskane krzywe przedstawione na rysunku 4 można zaobserwować, że w przypadku konfiguracji 300 A/120 s przewody AC-100 z miedzi elektrolitycznej w miejscu styku z nakładką węglową, a więc w obszarze największej gęstości prądu, charakteryzują się całkowitą utratą umocnienia. Dla przewodów AC-100 z miedzi srebrowej w miejscu styku z nakładką węglową dla parametrów testu 300 A/120 s występuje ok. 23% obniżenie twardości. Natomiast już w odległości 20 mm od źródła ciepła przewody w gat. CuAg0,10 charakteryzują się pierwotnymi właściwościami mechanicznymi (stan po ciągnięciu). Przy nagrzewaniu prądowym przewodów jezdnych w gat. ETP, przy konfiguracji 300 A/60 s w odległości ok. 15 mm od źródła ciepła następuje ponad 80% spadek ich twardości. Dopiero w odległości powyżej 40 mm od punktu

styku przewody te ponownie wykazują pierwotne właściwości mechaniczne.

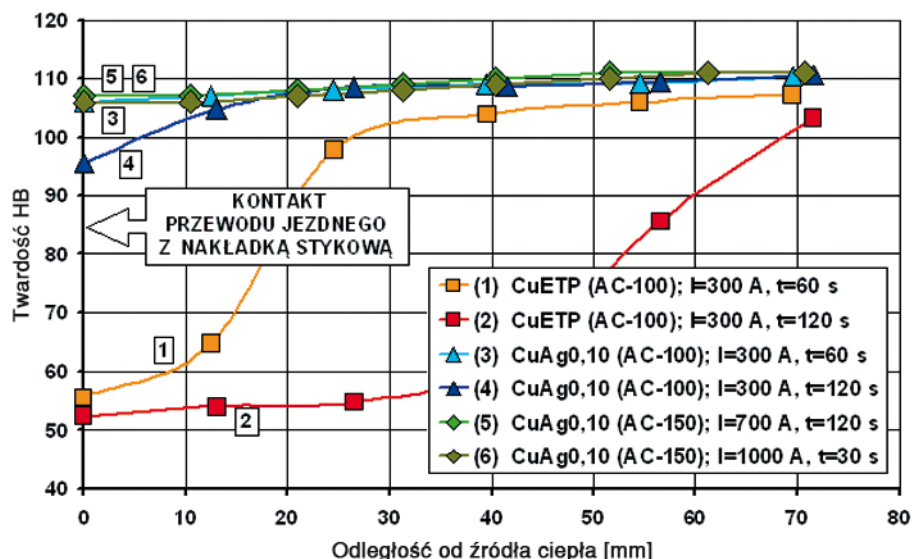
Wydłużenie czasu przepływu prądu przez zestyk z 60 do 120 s przy natężeniu 300 A w przypadku przewodów jezdnych wykonanych z miedzi elektrolitycznej spowodowało zwiększenie części obszaru w pełni zrekrytalizowanego materiału do odległości od źródła ciepła do 40 mm. Dopiero w odległości powyżej 70 mm od źródła ciepła przewody jezdne w gat. ETP mają twardość jak w stanie po ciągnięciu.

W przypadku przewodów AC-150 (Cu-Ag<sub>0,10</sub>) zarówno dla parametrów testu 700 A/120 s, jak i 1000 A/30 s nie obserwuje się praktycznie zmian w twardości (maks. 4% spadek twardości przewodu jezdnego w miejscu kontaktu z nakładką stykową). Świadczy to o tym, że dla podanych parametrów testów występujące warunki termiczne w obszarze kontaktu z nakładką stykową z kompozytu węglowo-metalicznego nie ostabiają właściwości mechanicznych przewodów jezdnych typu AC-150. Wyniki pomiarów twardości, cechy materiału będącej odbiciem zmian jego granicy plastyczności, pozostają w dobrym związku z wcześniejszymi danymi doświadczalnymi dotyczącymi zmian właściwości wytrzymałościowych przewodów jezdnych.

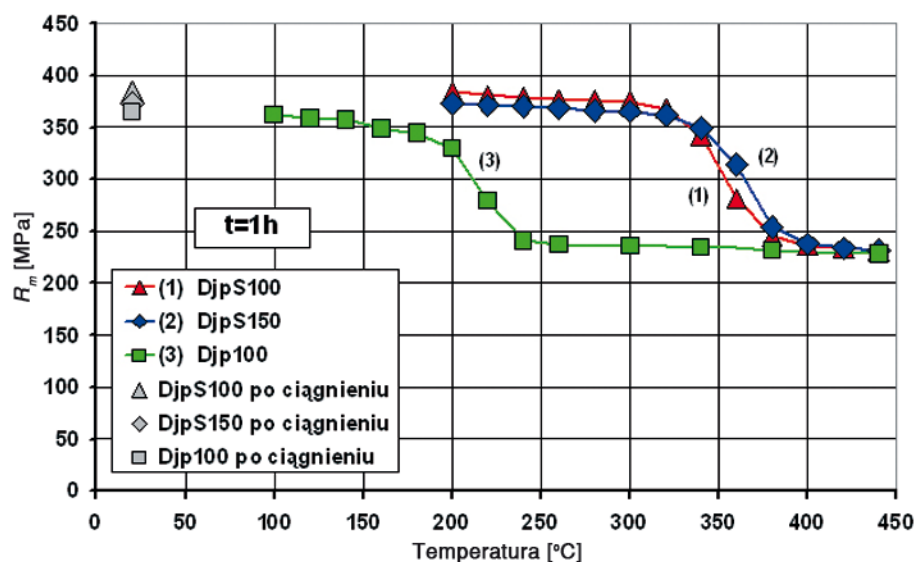
Przeprowadzone laboratoryjne badania wpływu wielkości natężenia prądu elektrycznego płynącego w różnym czasie na właściwości mechaniczne przewodów jezdnych w obszarze ich kontaktu z nakładką stykową z kompozytu węglowo-metalicznego zostały uzupełnione o badania wygrzewania statycznego przewodów w piecu z atmosferą ochronną.

Przeprowadzono zatem w sposób klasyczny badania odporności cieplnej umocnionego na drodze przeróbki plastycznej na zimno materiału. Badane przewody jezdne zarówno AC-100, jak i AC-150 mają zbliżone odkształcenie całkowite pochodzące z linii ciągniczej. (Przewody jezdne o przekroju poprzecznym 100 mm<sup>2</sup> wyprodukowano są na drodze ciągnięcia walcówki o średnicy 20 mm, odkształcenie całkowite wynosi 68%. Przewody jezdne o średnicy 150 mm<sup>2</sup> wykonuje się z walcówki o średnicy 22 mm, a więc z odkształceniem 60%).

Na rysunku 5 przedstawiono zależności zmian wytrzymałości na rozciąganie badanych przewodów wygrzewanych w zakresie temperatur od 100 do 440°C w czasie 1 godz. Zauważyć można



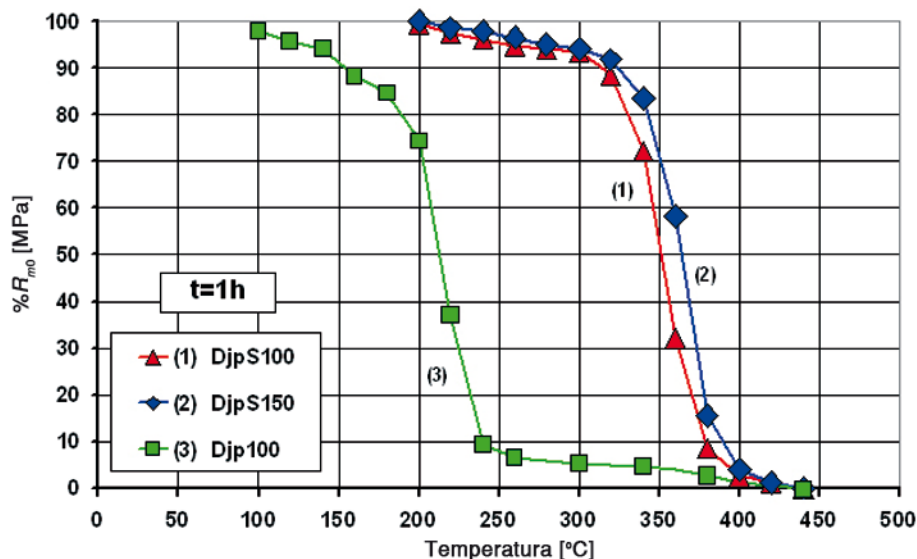
Rys. 4. Przebieg zmian twardości HB przewodów jezdnych poddanych nagrzewaniu prądowemu, w zależności od odległości obszarów pomiarowych od źródła ciepła



Rys. 5. Wpływ temperatury i czasu ekspozycji na zmianę wytrzymałości na rozciąganie dla przewodów jezdnych AC-100 w gat. CuETP, AC-100 oraz AC-150 w gat. CuAg<sub>0,10</sub>

bardzo wyraźne, w porównaniu do przewodów wykonanych z miedzi elektrolitycznej, przesunięcie zakresu stabilnych, wysokich właściwości wytrzymałościowych przewodów jezdnych z miedzi srebrowej w kierunku wyższych temperatur pracy o około 160°C. W następstwie prowadzonych od lat wielu badań wiadomo, że dodatek srebra do miedzi w ilości 1000 ppm nie prowadzi do przesycania stopu, charakteryzuje się on niezmienną i stabilną strukturą w podanym zakresie temperatur niezależnie od czasu ekspozycji. Efektem tego jest podniesienie dopuszczalnego zakresu temperatur pracy przewodu, w którym zachowane są stabilne i wysokie właściwości wytrzymałościowe [1, 2–4].

Analizując uzyskane dane doświadczalne można stwierdzić, że jednogodzinny czas wygrzewania przewodów sprawia, że bezpieczna temperatura z punktu widzenia zachowania wysokich właściwości wytrzymałościowych (gdyby przyjąć, że taką miarą jest dopuszczalne 5% obniżenie właściwości), dla AC-100 (ETP) nie



Rys. 6. Zależność procentowej zmiany wytrzymałości na rozciąganie przewodów jezdnych AC-100 w gat. Cu-ETP, AC-100 oraz AC-150 w gat. CuAg0,10 wygrzewanych w różnej temperaturze w czasie 1 godz.

przekracza 120°C, natomiast dla AC-100 i AC-150 (CuAg0,10) wynosi ona 260–280°C. Obserwując kształt krzywej  $\%R_{m0} = f(T, t)$  zauważyć można, że dla AC-100 (ETP) wygrzewanie począwszy już od 100°C/1 godz. następuje szybki spadek  $R_m$ , który dla 200°C wynosi już ok. 30% wartości w stanie po ciągnięciu. Wygrzewanie w temperaturze 240°C w czasie 1 godz. skutkuje 90% utratą pierwotnej wartości  $R_m$ . W przypadku przewodów AC-100 oraz AC-150 obserwuje się łagodny spadek  $R_m$  wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania.

Wytrzymałość na rozciąganie przewodów z miedzi srebrzej obniża swoją wartość o ok. 10% dopiero dla temperatury 340°C i czasu ekspozycji 1 godz., zaś 90% spadek wartości  $R_{m0}$  uzyskać można po wygrzewaniu w temperaturze 380°C w czasie 1 godz. (rys. 6).

Nieco wolniejsza dynamika procentowego spadku wytrzymałości na rozciąganie AC-150 wynikać może z warunków przeprowadzania testów, mianowicie w stosunkowo krótkim czasie wygrzewania, wynoszącym 1 godz., większa objętość próbki spowodowała proces nagrzewania w całej masie. Może być również efektem nieco mniejszej siły pędnej procesu rekryształizacji materiału, z którego wykonano AC-150, umocnionego odkształceniem całkowitym wynoszącym ok. 60%. (dla porównania AC-100 powstało na drodze ciągnięcia z odkształceniem całkowitym  $\epsilon = 68\%$ ).

Na rysunku 7 zamieszczono wykresy przedstawiające przebieg krzywych rozciągania badanych przewodów jezdnych wygrzewanych w różnej temperaturze w czasie 1 godz. Ukazane charakterystyki dotyczą testów po wygrzewaniu przewodów w trzech temperaturach: 300, 340, 380°C. Przebieg krzywych rozciągania potwierdza wysoką odporność cieplną przewodów z miedzi w gat. CuAg0,10; wygrzewane w tych samych warunkach przewody AC-100 oraz AC-150 (CuAg0,10) mają po ekspozycji w temperaturze 300 i 340°C/1 h blisko sześciokrotnie wyższą wartość granicy plastyczności w porównaniu do AC-100 (ETP), natomiast po wygrzewaniu w temperaturze 380°C/1 godz. różnica ta wynosi od 60 do 100% na korzyść przewodów z miedzi srebrzej.

## Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Miedź srebrowa w gat. Cu-Ag0,10, z której wykonano przewody jezdne typu AC-100 oraz AC-150, pozwala na istotne podwyższenie ich odporności cieplnej względem tradycyjnie stosowanych przewodów z miedzi w gat. ETP. Jak wynika z przeprowadzonych badań, dodatek 0,1% wag. srebra do miedzi prowadzi do podwyższenia odporności cieplnej tej klasy przewodów o co najmniej 150°C w stosunku do przewodów tradycyjnych, co sprawia, że zakres bezpiecznej temperatury pracy przewodu sięga 300°C.

2. Badania wykazały, że przewody jezdne typu AC-150 mogą, bez pogorszenia ich właściwości mechanicznych, przewodzić prąd o natężeniu większym o średnio 60% w porównaniu do AC-100 (ETP) i o średnio 40% w porównaniu do AC-100 (CuAg0,10) dla czasu przepływu prądu (przez zestyk: przewód–nakładka węglowo-metaliczna) do 40 s. Wydłużenie czasu przepływu prądu do 100 s powoduje zwiększenie dopuszczalnej wielkości natężenia prądu dla przewodów AC-150 od 50 do 75 % względem przewodów typu AC-100.

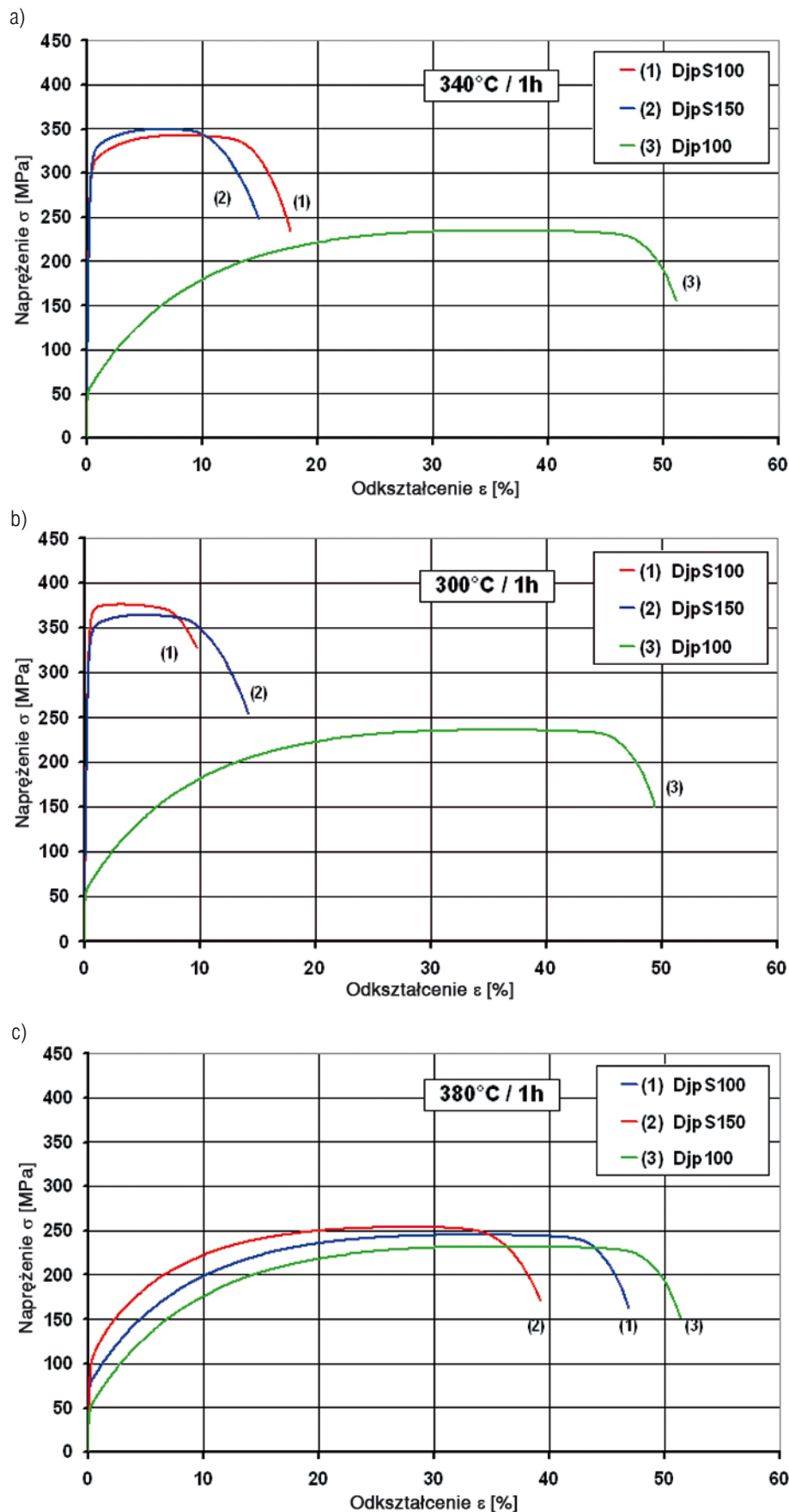
3. Powyższe właściwości przewodów jezdnych z miedzi srebrzej o przekroju 150 mm<sup>2</sup> mają kluczowe znaczenie z punktu widzenia bezpieczeństwa i pewności współpracy wszystkich elementów zasilania górnej sieci trakcyjnej. W szczególności zmniejsza się w znacznym stopniu niebezpieczeństwo przegrzania przewodu jezdnego i zerwania linii.

4. Przeprowadzone badania wykazały, że miedź srebrowa w gat. CuAg0,10, może być wykorzystana do produkcji elementów przewodzących, zwłaszcza przewodów jezdnych typu AC-150, wchodzących w skład nowoczesnych sieci trakcyjnych charakteryzujących się wysoką obciążalnością prądową oraz dużymi prędkościami jazdy pojazdów szynowych. □

## Literatura

- [1] Kawecki A.: *Dobór cech materiałowych przewodów jezdnych przeznaczonych do szybkich pojazdów szynowych*. Praca doktorska AGH 2006.
- [2] Kawecki A., Knych T., Mamala A.: *Przewody jezdne z miedzi srebrzej do wysokoobciążalnych mechanicznie i prądowo sieci trakcyjnych*. Konferencja Międzynarodowa „Przetwórstwo metali nieżelaznych”. IMN Gliwice, Zakopane 2006 (w druku).
- [3] Kawecki A., Knych T., Mamala A.: *Badania charakterystyk materiałowych przewodów jezdnych typu AC-100 z miedzi w gat. ETP oraz Cu-Ag0,10 w symulowanych warunkach eksploatacyjnych*. Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej „MET’2005 Nowoczesna Trakcja Elektryczna w Zintegrowanej Europie”, s. 42–49.

- [4] Kawecki A., Knych T., Mamala A.: *Badania porównawcze odporności cieplnej przewodów jezdnych Djp100 i DjpS100*. SEMTRAK 2004, XI Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i III Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie. Kraków Zakopane, 2004. Materiały konferencyjne, t.1, s. 65–76.
- [5] PN-EN 50149:2002 *Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacjonarne-Trakcja elektryczna – Profilowane druty jezdne z miedzi i jej stopów*.



Rys. 7. Krzywe rozciągania przewodów jezdnych: a) AC-100 w gat. CuETP, b) AC-100 oraz c) AC-150 w gat. CuAg0,10 wygrzewanych w różnej temperaturze w czasie 1 godz.